

ра») предполагается развертывание гармонизированной спутниковой телекоммуникационной инфраструктуры, которая будет включать:

- 12 КА на геостационарной орбите («Экспресс»), ≈ 110 Гбит/с;
- 4 КА на высокоэллиптической орбите («Экспресс-РВ»), $\approx 4,5$ Гбит/с;
- 264 КА на низких круговых орбитах («Марафон-IoT»), ≈ 30 млн аб. устройств;
- 28 КА на низких круговых орбитах («Гонец-М»), ≈ 3 млн аб. устройств.

В сети КА «Экспресс-РВ» будет обеспечиваться возможность работы абонентских терминалов

с антенной диаметром 60–70 см со скоростью до 80 Мбит/с (рис. 6)

Совместное использование космических аппаратов на ГСО и ВЭО в 3 раза повышает пространственную доступность спутниковых услуг (рис. 7).

Развертывание спутниковой системы «Марафон-IoT» предусматривает создание бесшовной глобально-распределенной сети IoT при соизмеримых ценовых и эксплуатационных параметрах абонентских устройств и сервисов, планируемых в перспективных сотовых сетях.

А.П. Кузьмичев (АНИИ)

РАЗВИТИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ МОНИТОРИНГА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И АРКТИКИ

Устойчивость работы средств радиосвязи, радионавигации, загоризонтной радиолокации в высокоширотных регионах Земли значительно усложняется из-за резкой изменчивости параметров среды распространения радиоволн — ионосферы, которая подвержена многим внешним факторам воздействия как естественного, так и искусственного происхождения.

Одним из факторов внешнего воздействия на ионосферу является создание искусственных ионосферных возмущений, вызванных воздействием мощных радиоволн, излучаемых с помощью специальных наземных коротковолновых (КВ) нагревных станций. В настоящее время в мире широкомасштабные исследования по созданию разнообразных искусственных возмущений в полярной ионосфере проводятся на двух КВ нагревных станциях: HAARP (Аляска, США) вблизи восточного сектора Российской зоны арктического побережья и EISCAT/Heating (Тромсё, Норвегия), расположенном в непосредственной близости к западному сектору прибрежной арктической зоны РФ. Одним из основных явлений, обусловленных воздействием мощных радиоволн КВ-диапазона, является возбуждение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) — «сгустков», или зон пониженной концентрации плазмы. МИИН вытянуты вдоль силовых линий магнитного поля на десятки километров, но при этом имеют поперечный размер единицы — десятки метров. Подобного рода неоднородности вызывают рассеяние сигналов декаметрового (ДКМ) и метрового диапазона при их прохождении через искусственно возмущенную область (ИВО) ионосферы, тем самым вызывая образование дополнительной траектории распространения.

Не менее критическое влияние на функционирование радиотехнических систем в высоких шירו-

тах оказывает зона активных высыпаний частиц — авроральный овал. При взаимодействии солнечного ветра и вмороженного в него межпланетного магнитного поля (ММП) с магнитосферой Земли генерируются электрические поля и токи, вызывающие геомагнитные возмущения — магнитосферные бури и суббури. Физические процессы, протекающие в периоды геомагнитной активности, сопровождаются изменениями аврорального овала с соответствующим увеличением его площади. Усиливающийся поток энергии электронов и ионов сопровождается свечениями (полярными сияниями), по форме, структуре, размеру и динамике которых можно судить о процессах, протекающих в различных частях магнитосферы. Область частых появлений полярных сияний представляет собой овал, расположенный на высотах E- и F-слоя ионосферы (90–110 км и 180–260 км соответственно) и смещенный на ночную сторону относительно геомагнитных полюсов.

Для оперативного мониторинга условий распространения радиоволн ДКМ-диапазона в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) и параметров ионосферы сотрудниками АНИИ развернута сеть наклонного радиозондирования ионосферы (НЗИ) — система пространственно разнесенных и синхронизированных по времени приемопередатчиков. Излученные одним диагностическим передатчиком сигналы одновременно регистрируются на всех пунктах приема сети, что позволяет исследовать характеристики ионосферы в точках отражения и усло-

вия распространения коротких радиоволн в обширном регионе. Информация, поступающая с сети НЗИ, отражает реальную картину распространения на конкретных радиотрассах, дает возможность определить максимальные и минимальные наблюдаемые частоты, траектории (моды) распространения радиоволн. В 2021

Рис. 1. Сеть пунктов наклонного зондирования ионосферы Росгидромета



году в состав сети был интегрирован новый приемный пункт на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» (арх. Северная Земля). Таким образом, на текущий момент сеть насчитывает шесть приемопередающих и три приемных пункта наблюдений (рис. 1).

Излучение зондирующих сигналов каждым приемопередающим пунктом осуществляется четыре раза в час. Результаты зондирования в режиме реального времени передаются в Полярный геофизический центр ААНИИ. Ежечасно формируется массив из 190 ионограмм, который необходимо обработать для диагноза условий распространения радиоволн декаметрового диапазона. Обработка такого массива данных в реальном времени возможна только при помощи программных средств, для чего необходимы эффективные алгоритмы автоматической обработки ионосферных данных, которые смогут идентифицировать параметры мод распространения радиосигналов на сложных высокоширотных ионограммах с хорошей точностью в режиме реального времени.

С целью развития методов мониторинга состояния ионосферы и условий распространения радиоволн в высоких широтах отдел геофизики ААНИИ проводит научно-исследовательские работы по следующим направлениям: оценка влияния МИИН, возбуждаемых излучением нагревных стенов, на условия распространения радиоволн; разработка модели определения положения видимых границ овала полярных сияний и ее верификация; разработка программных алгоритмов автоматического определения основных мод распространения диагностических сигналов наклонного зондирования ионосферы и их параметров.

Характеристики КВ-сигналов при ракурсном рассеянии по данным экспериментов и моделирования

Для учета влияния МИИН было выполнено исследование характеристик ракурсно-рассеянных на них КВ-сигналов, для этого использовались результаты экспериментальных работ по модификации высокоширотной ионосферы мощным КВ-радиоизлучением нагревного стенда EISCAT/Heating с 2011 по 2021 год. Эксперименты проводились с использованием фазированных антенных решеток «№ 1» (ФАР 1) и «№ 2» (ФАР 2) КВ нагревного стенда. ФАР 1 обеспечивает максимальную эффективную мощность излучения $P_{эфф} = 600 - 1200$ МВт в зависимости от частоты нагрева. Ширина диаграммы направленности ФАР 1 на уровне половинной мощности составляет порядка $5 - 6^\circ$, рабочий частотный диапазон $f_H = 5,4 - 8,0$ МГц. В ряде сеансов, особенно в годы минимальной солнечной активности, а также в вечерние часы, излучение мощной радиоволны осуществлялось на ФАР 2, работающей в диапазоне $f_H = 3,9 - 5,4$ МГц. Отметим, что ФАР 2 имеет ширину диаграммы направленности $12 - 14^\circ$ и обеспечивает $P_{эфф} = 200 - 250$ МВт. Мощная радиоволна обыкновенной (О-мода) или необыкновенной (Х-мода) поляризации излучалась в основном в направлении магнитного зенита (78°). В этих условиях создаются наиболее интенсивные искусственные ионосферные возмущения в поле мощной радиоволны. Отметим, что если вращение вектора \mathbf{E} мощной электромагнитной волны нагревного комплекса совпадает с направлением вращения электронов, то такая волна имеет необыкновенную (Х-мода) или левую поляризацию. Если вращение происходит в противоположную сторону, то волна обладает обыкновенной (О-мода) или правой поляризацией.

В качестве средств дистанционной диагностики МИИН использовались: многоканальный приемный КВ доплеровский комплекс, установленный на научно-исследовательской станции (НИС) ААНИИ «Горьковская» под Санкт-Петербургом; мобильный приемный КВ доплеровский комплекс на станции Ловозеро, Мурманская обл.; комплексы наклонного зондирования ионосферы с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ-комплексы), установленные на НИС «Горьковская», а также в Ловозеро и пос. Амдерма. Диагностирование МИИН осуществлялось методом ракурсного рассеяния диагностических сигналов. В качестве диагностических передатчиков использовались КВ радиовещательные станции, работающие в режиме амплитудной модуляции.

МИИН обеспечивают интенсивное ракурсное рассеяние радиоволн с частотами от единиц мегагерц до 500 МГц.

Ракурсно-рассеянные сигналы (РРС) на получаемых КВ доплеровским комплексом динамических спектрах — сонограммах проявляются в виде дополнительных треков, сдвинутых в отрицательную или положительную сторону от нулевой частоты, соответствующей распространению сигнала по дуге большого круга. Дополнительные треки наблюдаются в моменты излучения нагревного комплекса и отсутствуют в паузах. Величина и знак доплеровского смещения частоты определяются вектором скорости движения МИИН в искусственно возмущенной области ионосферы.

В качестве примера на рис. 2 представлены динамические доплеровские спектры диагностических КВ-сигналов, рассеянных на МИИН, регистрируемых в Ловозеро при излучении мощных радиоволн КВ-диапазона обыкновенной поляризации (О-мода).

Эффекты нагрева на ионограммах НЗИ проявляются в виде дополнительного трека с некоторой задержкой группового времени распространения радиосигнала относительно «прямых» сигналов на трассе, которые формируют регулярный вид ионограмм НЗИ (при отражении от ионосферных слоев E и F). Дополнительные треки на ионограммах НЗИ, обусловленные ракурсным рассеянием сигналов на МИИН, обладают следующими свойствами: наблюдаются на ионограммах в моменты работы нагревных комплексов и отсутствуют в паузах; имеют характерные временные задержки, определяемые геометрией заданной трассы наблюдений и местоположением КВ нагревного стенда; имеют частотный диапазон, зависящий от гелиогеофизических условий,

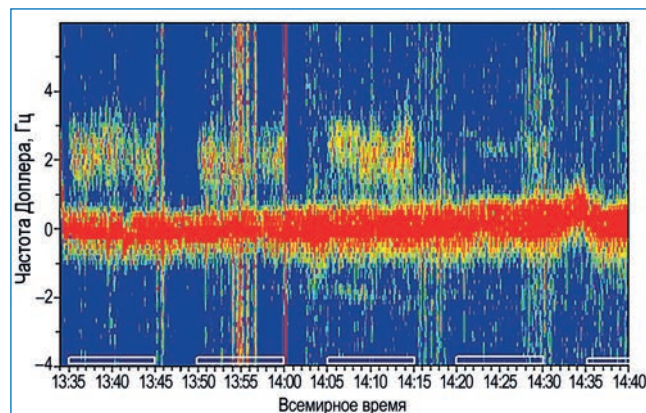


Рис. 2. Динамические доплеровские спектры диагностических КВ-сигналов, зарегистрированных на трассе Иссуден — Тромсё — Ловозеро на частоте 17620 кГц 10 октября 2011 года. Циклы нагрева отмечены на оси времени белыми прямоугольниками. Мощная радиоволна нагревного комплекса О-поляризации излучалась на ФАР 1 в направлении магнитного зенита на частоте 6200 кГц

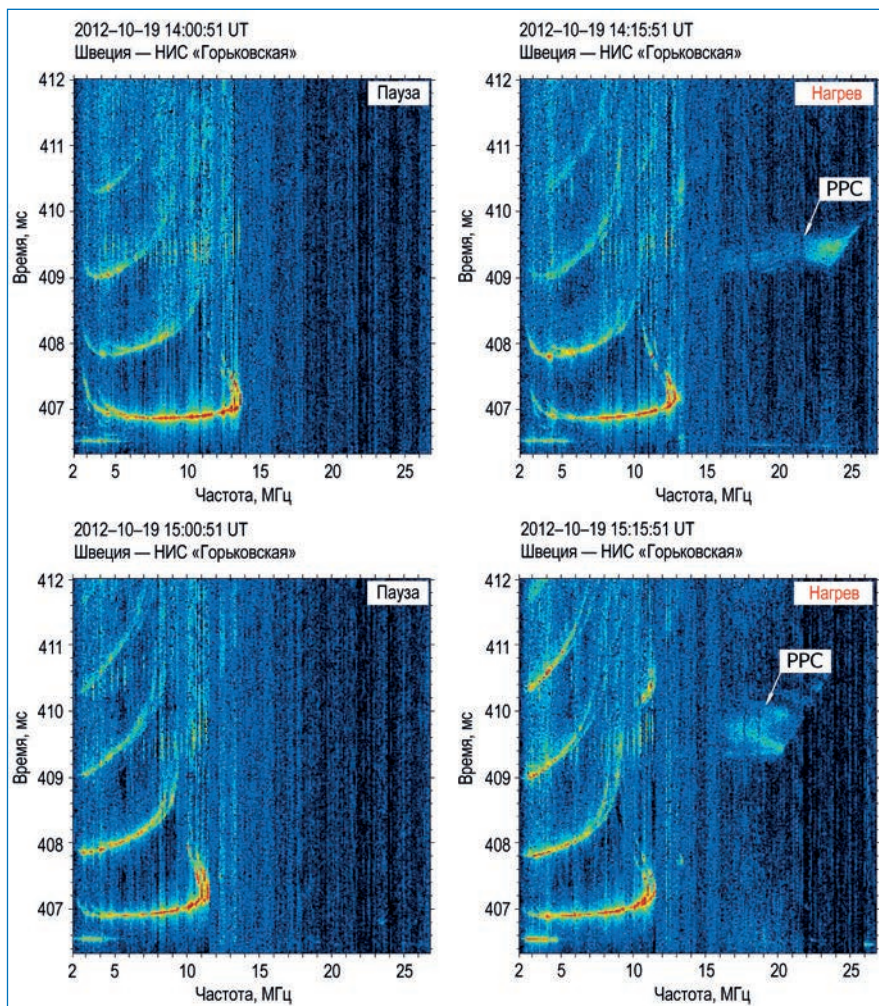


Рис. 3. Ионограммы наклонного зондирования ионосферы в паузах между циклами нагрева, а также в периоды нагрева с ракурсно-рассеянными сигналами на трассе Швеция — Горьковская 19 октября 2012 года

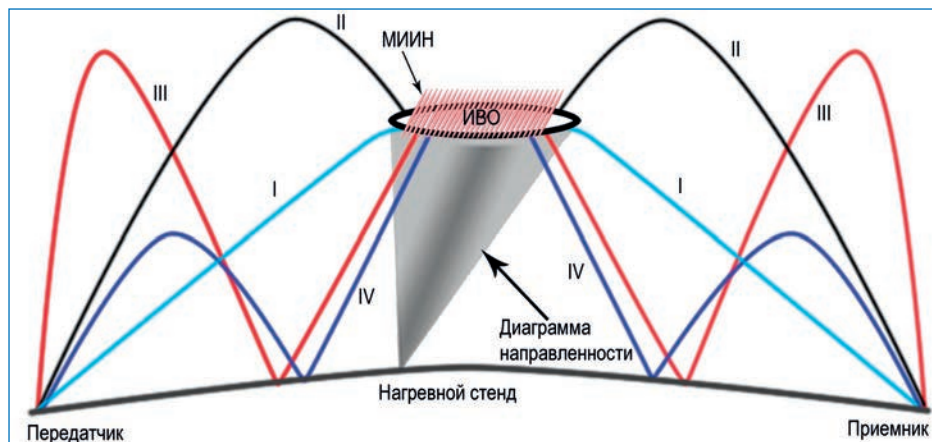
ориентации трассы PPC, моды распространения и режимов излучения мощных радиоволн нагревных стендов. Пример зарегистрированных PPC методом наклонного зондирования ионосферы 19 октября 2012 года на трассе Швеция — НИС «Горьковская» приведен на рис. 3.

По данным экспериментов, выполненных специалистами ААНИИ, установлено, что ракурсно-рассеянные на МИИН сигналы устойчиво регистрировались при различных режимах излучения КВ нагревного стенда (поляризация мощной радиоволны, тип используемой ФАР, отноше-

турные особенности высокоширотной ионосферы (главный ионосферный провал, спорадические крупномасштабные неоднородности на высотах E- и F-слоев).

В качестве примера на рис. 4 показан характерный вид рассчитанных по разработанной программе траекторий КВ-радиосигналов, рассеянных на МИИН, созданных нагревным стендом. Расчеты выполнены для ионосферных градиентов в искусственно возмущенной области ионосферы (ИВО), соответствующих фоновым значениям.

Рис. 4. Схема траекторий распространения радиосигнала на трассах «передатчик» — ИВО и ИВО — «приемник». I, II, III и IV — траектории радиосигналов



Оценка точности определения видимых границ авроральных высыпаний

Развитие алгоритмов и методик определения положения видимой экваториальной границы аврорального овала является неотъемлемой частью решения научных и прикладных задач, связанных с разработкой моделей химического состава ионосферы, моделей авроральных высыпаний частиц, обеспечением безаварийного функционирования техногенных систем в Арктике.

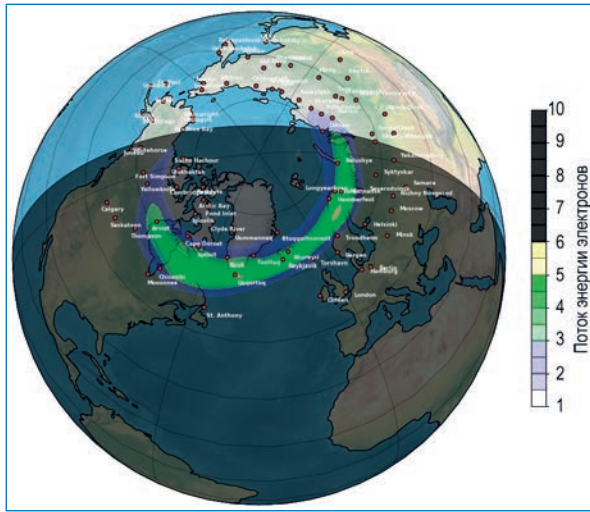


Рис. 5. Пример расчета овала авроральных высыпаний моделью OVATION Prime (PC)

На предыдущем этапе исследований авроральной ионосферы в ААНИИ была разработана модифицированная модель OVATION Prime (PC) (OV-PC). В отличие от оригинальной модели OVATION Prime (2010), в OV-PC в качестве входного параметра используется наземный индекс полярной шапки (PC-индекс), который повышает точность оценки характеристик аврорального овала, однако в настоящее время исключает возможность их прогноза больше чем на 15 минут. Пример моделирования овала полярных сияний представлен на рис. 5.

Индекс полярной шапки (PC) был впервые предложен О.А. Трошичевым и соавторами в 1988 году в качестве меры геомагнитных эффектов в полярной шапке, вызванных холловскими токами. Индекс PC рассчитывается по величине горизонтальной компоненты магнитных возмущений поля, измеряемых на полярных станциях вблизи южного и северного геомагнитного полюса. В настоящее время используются данные двух приполюсных станций: Канак (Туле) в Арктике и Восток в Антарктике. Индекс PCN обозначает северный индекс по данным станции в Туле, PCS — южный, по данным станции Восток.

На данном этапе работ выполнялась апробация модели OV-PC, для чего была выбрана наземная наблюдательная сеть оптических камер всего неба проекта THEMIS (Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms), запущенная в 2008 году и функционирующая в настоящее время. Проект THEMIS включает в себя 20 камер, расположенных в Канадском секторе и распределенных по долготе от Канады до Аляски. Пространственное разрешение снимков камер составляет примерно 1 километр, временное разрешение около 3 секунд.

Южная граница полярных сияний может не иметь четко выраженной краевой дуги, по которой можно с высокой точностью определить ее положение. Поэтому широта границы видимых сияний выбиралась по потоку энергии выпадающих частиц космического происхождения (в единицах эрг·см⁻²·с⁻¹), которые при взаимодействии с атомарным кислородом, молекулярным азотом и кислородом вызывают свечения разных оттенков: красного (630 нм), голубого (427,8 нм) и зеленого (557,7 нм) соответственно. Значение потока энергии, равное 1 эрг·см⁻²·с⁻¹, считается минимальным пороговым потоком, вызывающим свечение высокоширотной ионосферы на высотах выше 90 км, которое может уви-

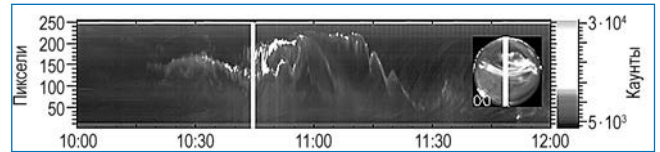


Рис. 6. Кеограмма, полученная по серии снимков с камер всего неба. Справа на кеограмме изображен пример области снимка, которая была выделена и перенесена на комбинированное изображение

деть адаптированный к полной темноте глаз человека. Однако в реальных условиях столь малый поток энергии, и вызываемое им свечение, может быть плохо различимо на небосводе в силу ряда естественных факторов, таких как: шумовая засветка небосвода, неравномерность высыпаний в активной зоне и вдоль границы сияний и т. д. Поэтому минимальное значение потока энергии для моделей авроральных высыпаний частиц рекомендуется выбирать равное 2 эрг·см⁻²·с⁻¹, а для оптических камер в промежутке от 1,5 эрг·см⁻²·с⁻¹ до 2 эрг·см⁻²·с⁻¹, в зависимости от того, насколько хорошо наблюдаемые границы соответствуют модельным границам.

В целях оценки точности положения видимых границ в модели авроральных высыпаний OVATION Prime (PC) была проведена первичная обработка списка изолированных авроральных магнитных суббурь, содержащих в себе события за период 2008–2010 годов. Для каждого события (порядка 1000 суток с событиями) вручную были просмотрены кеограммы высокоширотных станций канадской цепочки THEMIS.

Для построения кеограмм на каждом снимке камеры выделялась узкая вертикальная область (обычно не более нескольких пикселей), сориентированная строго с севера на юг и содержащая центральную точку снимка (азимут). Выделенная область копировалась и объединялась с подобными областями на остальных снимках в хронологическом порядке, образуя комбинированное изображение (кеограмму). Вдоль оси OX на кеограмме отмечено время, вдоль оси OY пиксели выделенной области (центральной части снимка). На рис. 6 приведен пример построенной кеограммы.

Для анализа были выбраны кеограммы, построенные при трех различных уровнях геомагнитной возмущенности, отобранные по средней величине PC-индекса: PC0 < 2,5 мВ/м (слабовозмущенный уровень), 2,5 < PC1 < 4 мВ/м (средневозмущенный уровень) и 4 < PC2 < 8 мВ/м (сильно возмущенный уровень). Сравнение наблюдаемых и расчетных границ овала производилось поточно, путем вычисления средней дельты их широты $\Delta\lambda$ для каждого из трех уровней возмущенности:

$$\Delta\lambda = \Delta\text{lat} = \text{CGLat}_{\text{keo}} - \text{CGLat}_{\text{mod}}$$

где $\text{CGLat}_{\text{keo}}$ и $\text{CGLat}_{\text{mod}}$ — исправленная геомагнитная широта южной границы полярных сияний, определенная по кеограмме и рассчитанная по модели OV-PC соответственно.

Рис. 7 показывает величины Δlat , полученные при сравнении всех распознанных на кеограммах границ овала по разным пороговым значениям потока энергии со всеми вычисленными моделью OV-PC. По осям OX на рис. 7 отложены пороговые значения потока энергии для модельных границ, при этом каждый отдельный график соответствует конкретному потоку энергии, по которому определялись границы на кеограммах. Уровни геомагнитной активности отмечены цветными линиями: PC0 (синий), PC1 (зеленый), PC2 (красный). Из представленных результатов видно, что для всех трех уровней

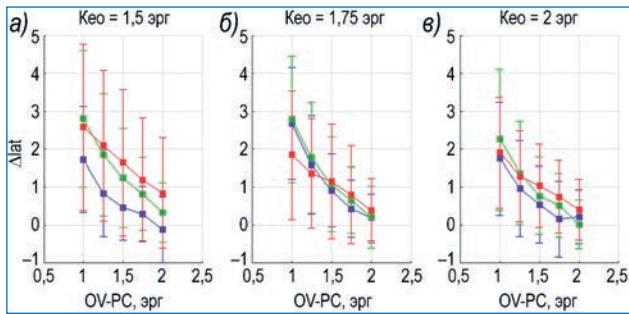
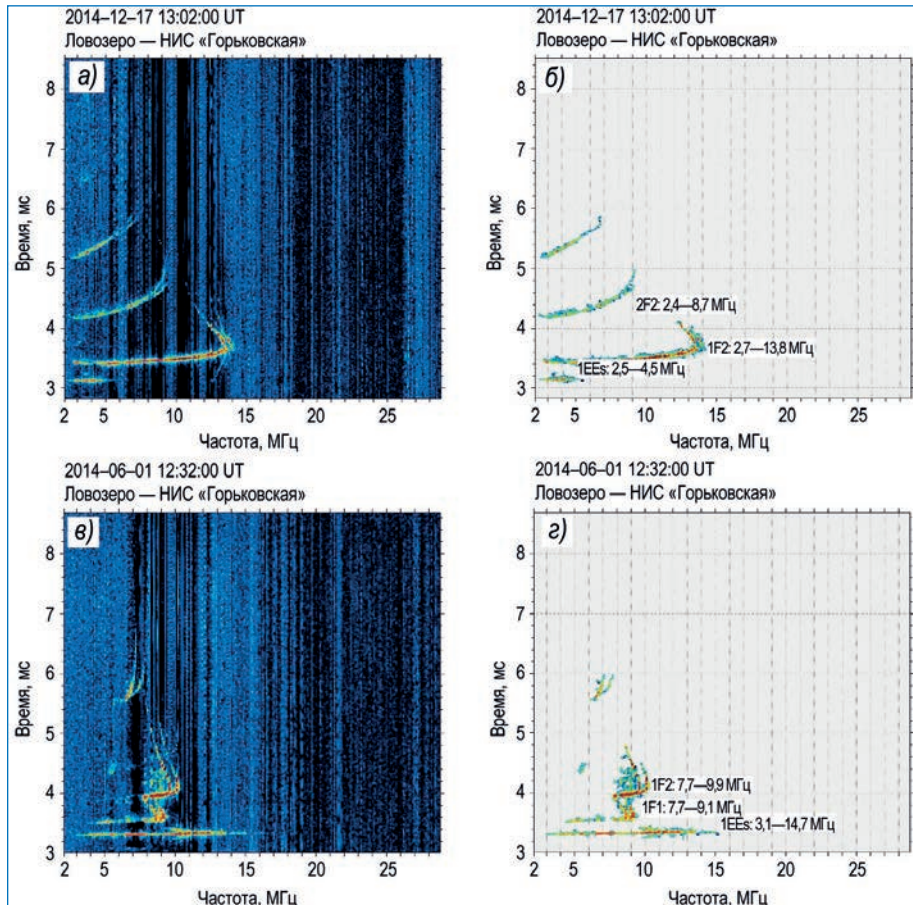


Рис. 7. Величины Δlat , полученные при сравнении всех распознанных на кеограммах границ овала по разным пороговым значениям потока энергии со всеми вычисленными моделью OV-PC. Графики соответствуют конкретному потоку энергии, по которому определялись границы на кеограммах: а) — $1,5_{\text{кео}} \text{ эрг}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, б) — $1,75_{\text{кео}} \text{ эрг}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ и в) — $2_{\text{кео}} \text{ эрг}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$

возмущенности наиболее точно соответствуют друг другу модельные границы, выбранные по критерию $2_{\text{ov-pc}} \text{ эрг}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ и наблюдаемые на кеограммах по критерию $1,75\text{--}2_{\text{кео}} \text{ эрг}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

Для выбранных пороговых значений потока энергии отклонение модельной широты границ сияний от наблюдаемой камерами THEMIS в среднем не превышает $\pm 1^\circ$ примерно в 73 % случаев для низкого уровня, 87 % для среднего уровня и 75 % для высокого уровня геомагнитных возмущений. На основании полученных результатов можно заключить, что точность определения границ видимых сияний в модели OVATION Prime (PC) в ночной части овала по оптимальным критериям сравнения составляет примерно 1°CGLat со среднеквадратичным отклонением $\pm 1^\circ \text{CGLat}$.

Рис. 8. Пример автоматической обработки ионограмм НЗИ: а, в — исходные данные, б, г — фильтрация, автоматическое выделение треков и определение их характеристик на трассе Ловозеро — Горьковская (900 км); а, б соответствуют зимним условиям, а, в, г — летним условиям



Разработка алгоритмов сопоставления треков, наблюдаемых на ионограммах наклонного зондирования ионосферы, с основными способами распространения радиоволн на исследуемых радиотрассах

Для исследования параметров ионосферы и условий распространения радиоволн в Арктической зоне РФ развернута сеть станций наклонного зондирования ионосферы. Оперативная диагностика состояния ионосферы и условий распространения радиоволн в режиме реального времени требует обработки большого объема входящей информации (ионограмм), что возможно только при помощи электронно-вычислительных средств. Поэтому большое внимание было уделено разработке алгоритмов автоматического определения параметров основных способов распространения радиоволн на высокоширотных трассах НЗИ. Разрабатываемые алгоритмы должны идентифицировать сигналы первого и второго скачка с отражением от ионосферных слоев E , $F1$ и $F2$, а также для каждого трека определять диапазон частот и время группового запаздывания.

С целью решения поставленной задачи все радиотрассы НЗИ были разделены на две группы — протяженностью до 2000 км и более 2000 км. Идентификация треков и их обработка на трассах протяженностью более 2000 км затруднены, поскольку наблюдается значительно большее количество возможных способов распространения радиоволн из-за возникновения условий для многократных комбинированных мод распространения (например, $1E1F2$, $1Es1F2$, $1F21Es$).

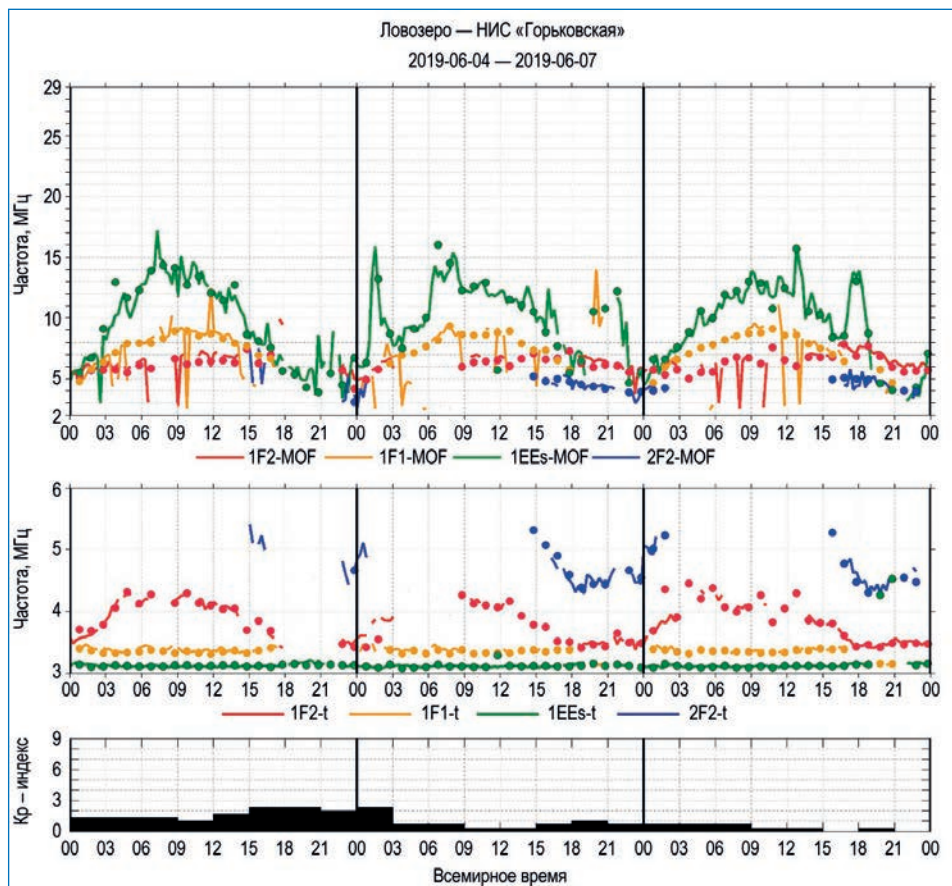
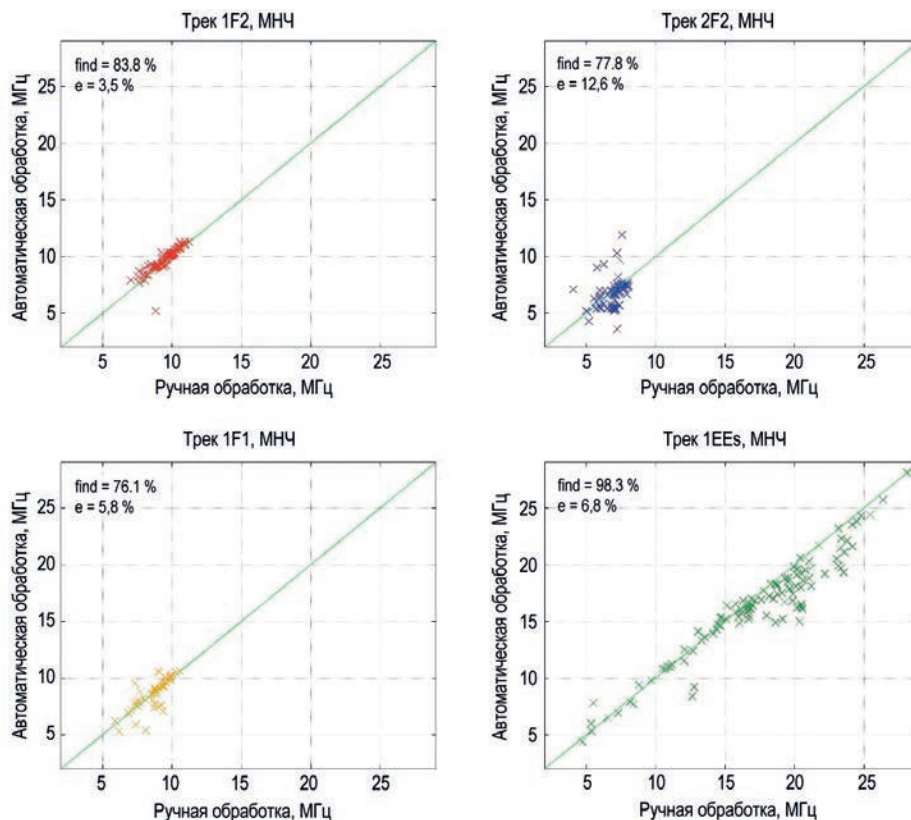


Рис. 9. Результат ручной (точки) и автоматической (линии) обработки ионограмм НЗИ на трассе Ловозеро — Горьковская за интервал 4–6 июня 2019 года

Рис. 10. Статистическая оценка результатов работы алгоритмов автоматической обработки ионограмм НЗИ для трасс протяженностью менее 2000 км в сравнении с ручной обработкой. МНЧ — максимально наблюдаемая частота треков 1F2 (а), 2F2 (б), 1F1 (в) и 1EEs (г). find — вероятность правильного обнаружения, e — ошибка определения значения



На первом этапе осуществлялась фильтрация первичных данных. Для анализа трековой структуры были разработаны алгоритмы очистки ионограмм НЗИ. На рис. 8 приведен пример автоматической обработки ионограмм НЗИ на трассе Горьковская — Ловозеро в год максимума солнечной активности зимой (17 декабря 2014 года) и летом (1 июня 2014 года). Идентификация треков проводилась по способу распространения. Как ясно следует из рис. 8, наблюдалось удовлетворительное соответствие между экспериментальными и расчетными данными.

На рис. 9 показан результат ручной (точки) и автоматической (линии) обработки ионограмм НЗИ на трассе Ловозеро — Горьковская за интервал 4–6 июня 2019 года. Видно, что алгоритмы, проверенные в период максимума солнечной активности, могут быть также успешно использованы в периоды минимума, демонстрируя только изменчивость ионосферы для разной солнечной активности (отличаются значения МНЧ и задержек).

На рис. 10 представлены статистические оценки результатов работы алгоритмов автоматической обработки ионограмм НЗИ в сравнении с ручной обработкой. Как следует из рис. 10, наблюдается согласие результатов автоматической и ручной обработки ионограмм НЗИ.

По результатам выполненных исследований были разработаны алгоритмы автоматического определения параметров основных способов распространения радиоволн на высокоширотных трассах НЗИ, проведено тестирование разработанных алгоритмов для ряда интервалов спокойных и возмущенных геофизических условий в период максимума и минимума 24-го цикла солнечной активности. Точность определения типов треков в среднем составила 87 % в спокойных и 71 % в возмущенных условиях. Точность определения треков с аномальными способами распространения (распространяющимися с отклонениями от дуги большого круга) — 76 %. Относительная ошибка определения частотных диапазонов отдельных треков не превышает 9 % (для спокойных геофизических условий).

Анализ выполнен по данным нескольких трасс наклонного зондирования ионосферы (протяженностью от 800 до 3700 км), расположенных в субавроральной и авроральной зонах. Разработанные алгоритмы автоматической обработки сигналов НЗИ внедрены в деятельность Полярного геофизического центра ААНИИ с целью оперативного мониторинга условий распространения радиоволн декаметрового диапазона в АЗРФ.

Научно-исследовательские работы, выполненные в 2021 году, были направлены на развитие и усовершенствование методов мониторинга состояния ионосферы, ее влияния на условия распространения радиоволн декаметрового диапазона в Арктической зоне. В ходе выполнения этапа 2021 года были получены следующие основные результаты.

Проведен анализ характеристик КВ-сигналов при ракурсном рассеянии на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях, вызванных воздействием мощных радиоволн нагревного стенда EISCAT/Heating. Наблюдения выполнялись по данным средств дистанционной диагностики ААНИИ на основе использования многоканальных КВ доплеровских комплексов и комплексов наклонного зондирования ионосферы.

Создано программное обеспечение «Определение зон ракурсного рассеяния диагностических КВ-сигналов», предназначенное для определения параметров траекторий распространения КВ-радиосигнала на трассе «передатчик» — «искусственно возмущенная область (ИВО)» — «приемник» с учетом ракурсного рассеяния диагностического сигнала на МИИН в искусственно возмущенной области ионосферы. Разработанное программное обеспечение позволяет определить возможность приема КВ-радиосигналов, распространяющихся через ИВО в заданное место приема.

Разработан метод оценки точности границ видимых сияний модели OVATION Prime (PC) по данным оптических наблюдений. Диагностирование положения экваториальных границ аврорального овала при разных магнитосферных условиях является неотъемлемой частью исследований, связанных с разработкой моделей химического состава ионосферы, моделей авроральных высыпаний частиц и условий распространения радиоволн. Статистические точностные оценки модели были получены посредством сравнения видимых границ овала полярных сияний по данным оптических наблюдений сети камер всего неба проекта THEMIS и расчетных значений.

Разработаны алгоритмы автоматического определения параметров основных способов распространения радиоволн на высокоширотных трассах наклонного зондирования ионосферы. Алгоритмы позволяют идентифицировать сигналы первого и второго скачка с отражениями диагностических сигналов от ионосферных слоев E , $F1$ и $F2$. Для каждого трека алгоритмы определяют диапазон частот и время группового запаздывания. Предложены основные критерии поиска аномальных (боковых) способов распространения радиоволн по данным НЗИ.

Выполнена проверка разработанных алгоритмов по данным нескольких трасс наклонного зондирования ионосферы, расположенных в субавроральной и авроральной зонах, протяженностью от 800 до 3700 км. Сравнение результатов ручной и автоматической обработки ионограмм НЗИ для ряда интервалов спокойных и возмущенных геофизических условий в периоды максимума и минимума 24-го цикла солнечной активности показало удовлетворительное согласие. Точность определения типов треков основных способов распространения в среднем составила 87 % в спокойных и 71 % в возмущенных условиях.

Разработанные модели и алгоритмы будут внедрены в систему обработки первичной информации Полярного геофизического центра ФГБУ «ААНИИ», что позволит повысить точность диагноза состояния высокоширотной ионосферы, условий распространения радиоволн и информативность электронных ресурсов, в частности развития туристического сегмента в Арктике (прогноз, интенсивность и положение овала полярных сияний).

Отдел выражает большую благодарность за поддержку геофизических исследований Высокоширотной арктической экспедиции и Российской научной арктической экспедиции на арх. Шпицберген.

А.С. Калишин, Н.Ф. Благовещенская, А.В. Николаев, Т.Д. Борисова, Д.Д. Рогов.